بررسی آزمایشگاهی و عددی حساسیت باربری محوری فشاری اعضای لوله‌ای فولادی به ناراستی‌های هندسی

مهدی عزتی[1*]، مصطفی زین‌الدینی[2]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ Mezzati@sina.kntu.ac.ir
۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ Zeinoddini@Kntu.ac.ir

چکیده

اعضای لوله‌ای درعمل به دلیل فرآیند ساخت و آسیب‌های وارده در مراحل حمل و نقل و نصب لوله فاقد یک هندسه استوانه‌ای کامل و بی‌نقص هستند. در واقع ناراستی‌هایی در مقطع و طول آن‌ها وجود دارد. حضور ناراستی می‌تواند بر رفتار اعضای لوله‌ای مقابل بارهای وارده تا حد زیادی تاثیر گذار باشد. در این پژوهش، تاثیر حضور ناراستی بر رفتار اعضای لوله‌ای تحت بارگذاری یک سویه محوری فشاری به صورت آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا چهار نمونه آزمایشگاهی از لوله فولادی با درجه X70 و با نسبت قطر به ضخامت (D/t) ۲۲ پس از انجام اسکن سه بعدی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج نشان دادند که حضور ناراستی در اعضای لوله‌ای منجر به بروز کمانش محلی در لوله شده و بر تنش فشاری حداکثر قابل تحمل در عضو (σ_L) و کرنش معادل آن(ε_L) تاثیر گذار است. هندسه ناراستی در نظر گرفته شده در مدل عددی بر اساس مودهای مختلف کمانش در اعضای لوله‌ای می‌باشد. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده و به طور کلی مطابقت قابل قبولی مشاهده شده است. در ادامه از مدل عددی به منظور بررسی تاثیر عواملی مانند هندسه ناراستی، دامنه ناراستی (A)، نسبت D/t و نسبت λ/L استفاده شده است. نتایج نشان دادند که مودهای بالاتر و متقارن، تاثیر بیشتری بر رفتار یک سویه فشاری اعضای لوله‌ای دارد. با افزایش دامنه ناراستی، σ_L و ε_L کاهش می‌یابند اما مرتبه کاهش هر دو پارامتر متاثر از هندسه ناراستی و نسبت D/t و λ/L است. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشخص است که تاثیر ناراستی بر ε_L بسیار بزرگتر از تاثیر ناراستی بر σ_L است.

کلمات کلیدی: مطالعه عددی، مطالعه تجربی، اعضای لوله‌ای فولادی، ناراستی هندسی، بارگذاری یک سویه فشار محوری، کمانش محلی

An Experimental/Numerical Study on the Sensitivity of Axial Compressive Load Bearing Response of Steel Tubular to Geometrical Imperfections

M. Ezzati[1], M. Zeinoddini[2]

1. MSc. Student, K.N.Toosi University of Technology
2. Associate Professor, K.N.Toosi University of Technology

Abstract

In practice, steel tubulars lack a mathematically perfect cylindrical shape, due to non-uniformities introduced during the manufacturing process, construction methods, damages incurred in the transport. The imperfections might exist in the cross section and along the tubular member. Imperfections can greatly affect the behavior of tubular members. The work

[*] **نویسنده مسئول مقاله:** Mezzati@sina.kntu.ac.ir

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.7.0]

presented in this paper is perusing effect of geometrical imperfections on steel tubes under monotonic axial compressive loading. An experimental model testing along with a numerical simulation approach has been employed.
The small scale experiments were conducted on X70 steel pipes with diameter 44 (mm) and *D/t* of 22. The results showed that under monotonic loading the presence of imperfection in the tubular member leads to local buckling of the tube and has a decreasing effect on the limit stress (σ_L) and on the strain corresponding to the ultimate load (ε_L). The geometry of the imperfections introduced to the numerical model is based on the scaled down buckling mode shapes of the tubular specimen. In general, a reasonable agreement has been noticed between the experimental and the numerical results.
The numerical model has then been used to study the effect of geometry of imperfection and imperfection amplitude (*A*), *D/t* and (λ/L) on the response of steel tubes to monotonic axial compressive loading. The results showed that the monotonic response was more sensitive to higher mode shapes as compared to the lower modes and to symmetric modes as compare to non-symmetric modes. The limit stress and the strain corresponding to the ultimate load decrease as imperfection amplitude increases. The stress-strain path was also found to be affected by the geometry of imperfections, *D/t* and the imperfection wave length. The results of the current study also shows that the tube imperfection has a more profound effect on the limit strain (ε_L) in comparison to that on the limit stress (σ_L).
Keywords: Experimental study, Numerical study, Steel tubular members, Imperfection, Monotonic axial compressive loading, Local buckling

۱- مقدمه

اعضای لوله‌ای در صنایع دریایی از جمله خطوط لوله، اعضای سکوهای دریایی، سازه های اسکله و ... کاربرد فراوانی دارند. هندسه اعضای لوله‌ای پس از ساخت هیچ‌گاه به صورت کامل و بی نقص نیستند. هر چند با انجام کنترل‌های کیفی و بهینه‌سازی فرایند ساخت، ناراستی‌های هندسی محدود شده اما حذف کامل آن‌ها امری غیر ممکن است. اگرچه ممکن است هندسه اعضای لوله‌ای پس از ساخت به نظر کامل و بی نقص به نظر برسد اما انجام اندازه‌گیری‌های دقیق و عکس‌برداری‌های سه بعدی، حضور ناراستی‌های هندسی را نشان می‌دهند. از طرفی اعضای لوله‌ای در هنگام حمل و نقل و نصب، در معرض بارهای مختلفی قرار می‌گیرند که می‌توانند منجر به ناراستی‌های مختلفی شود. همچنین در مقاطعی مانند اتصالات موجود در سکوهای نفتی که با کاهش یا افزایش قطر و ضخامت روبه‌رو هستیم، حضور ناراستی‌های اولیه تا حد زیادی می‌توانند بر رفتار سازه‌ای در این نواحی تاثیرگذار باشد. یکی از موارد مهم طراحی اعضای لوله‌ای، پایداری آن‌ها تحت بارگذاری یک سویه است[۱و۲]. تعدادی از محققین قبلی اثر ناراستی‌های هندسی را بر اعضای لوله‌ای مورد توجه قرار داده‌اند. در سال ۱۹۶۹ تحقیقی در زمینه تاثیر ناراستی‌های هندسی بر کمانش اعضای لوله‌ای به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با حضور ناراستی‌های هندسی، بار معادل کمانش به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد[۳]. محققینی در سال ۲۰۰۰ گسیختگی پوسته‌های استوانه‌ای تحت خمش و فشار خارجی را به منظور در نظر گرفتن اثر ناراستی‌های هندسی و تنش پسماند در مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند[۴]. در سال ۲۰۰۲ مطالعاتی بر روی مقاومت کمانشی اعضای استوانه‌ای و مخازن بر روی بستر صلب و انعطاف پذیر انجام شد. نتایج حاکی از آن بودند که با افزایش دامنه ناراستی‌های هندسی، مقاومت کمانش در برابر بارگذاری یکسویه فشاری تا حد زیادی کاهش می‌یابد[۵]. متصل کردن قسمت‌های مختلف خطوط لوله و مخازن با استفاده از عملیات جوشکاری می‌تواند باعث ایجاد ناراستی‌های هندسی موضعی شوند. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که ناراستی‌های ناشی از جوشکاری عموماً دارای ظاهری متقارن هستند. اثر ناراستی‌های موضعی اولین بار در سال ۱۹۸۳ مورد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.7.0]

بررسی قرار گرفته است[۶]. در سال ۲۰۰۶ تاثیر هندسه ناراستی‌های موضعی بر بار معادل کمانش در پوسته‌های استوانه‌ای که تحت بارگذاری یک‌سویه فشاری قرار می‌گیرند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که ناراستی‌های مثلثی شکل بیشترین تاثیر را بر کاهش مقاومت کمانشی دارد[۷]. در سال‌های اخیر نیز محققینی مختلفی در سال ۲۰۱۱[۸]، در سال ۲۰۱۲[۹] و... به بررسی تاثیر ناراستی‌های هندسی بر کمانش اعضای لوله‌ای پرداخته‌اند. در سال ۲۰۱۲[۱۰]، اثر حضور ناراستی‌های مثلثی شکل در میانه لوله بر بار معادل کمانش به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که دامنه ناراستی بیشترین تاثیر را بر بار معادل کمانش دارد. در ادامه در سال ۲۰۱۲[۱۱] تاثیر هندسه ناراستی‌های موضعی مانند قرشدگی بر باربری اعضای لوله‌ای به صورت عددی مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که هندسه و مکان قرارگیری قرشدگی به میزان قابل توجهی بر باربری اعضای لوله‌ای تاثیر گذار است.

در این پژوهش با توجه به اینکه مودهای کمانش اعضای لوله‌ای تحت بارگذاری یک‌سویه فشاری به ازای کمترین انرژی وارد بر عضو به‌دست می‌آیند، هندسه ناراستی اولیه در نظر گرفته شده در اعضای لوله‌ای بر اساس مودهای کمانش در لوله‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین با استفاده از داده برداری سه بعدی از سطح نمونه‌های آزمایشگاهی، هندسه سه بعدی یکی از نمونه‌ها بادقتی در حدود ۳۰ میکرون شبیه‌سازی شده و ناراستی‌های موجود در آن‌ها قبل از آزمایش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اساس اندازه‌گیری در این سیستم بر مبنای مثلث بندی می‌باشد که با اخذ دو تصویر متقارب از سطح شیئ به تولید مختصات سه‌بعدی می‌پردازد. دو عامل مذکور در مطالعات گذشته مورد توجه قرار نگرفته‌اند. از مدل عددی همچنین به منظور بررسی تاثیر ناراستی و عواملی مانند هندسه ناراستی، دامنه ناراستی، نسبت قطر به ضخامت لوله و نسبت طول موج ناراستی به طول لوله، بر رفتار اعضای استوانه‌ای تحت بارگذاری یک سویه فشاری استفاده شده است.

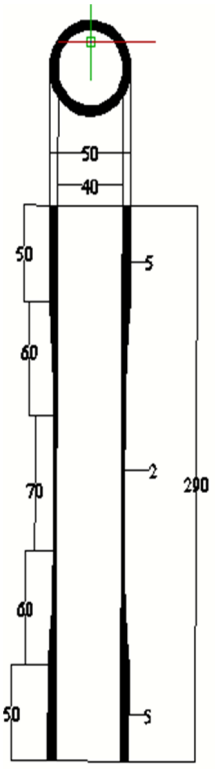
۲- تنظیمات آزمایشگاهی

لوله‌های مورد استفاده در این پژوهش از نوع X70 انتخاب شده است که در اجرای لوله‌ها و سازه‌های مهم فراساحل مورد استفاده قرار می‌گیرند. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مواد با انجام آزمایش کشش استاندارد کوپن، از شاخه لوله موجود، استخراج شده است. در جدول ۱ مشخصات مکانیکی لوله ارائه شده است. نمونه‌ها از لوله‌ای با قطر خارجی اولیه (OD) ۵۰ میلیمتر و ضخامت اولیه (t) برابر ۵ میلیمتر تراشکاری شده‌اند. دقت تراشکاری در این بخش حدود ۰/۰۵ میلیمتر تخمین زده شده است. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه (Servo-Hydraulic Dynamic Testing Instron 8502 System) انجام شده است. شکل ۱ مشخصات هندسی نمونه‌های مورد استفاده در آزمایشات و مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد. طول کلی هر نمونه برابر ۲۹۰ میلیمتر است. شکل ۲ نمایی کلی از انجام آزمایش یک سویه فشاری را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی لوله

درجه لوله	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ازدیاد طول	مدول الاستیسیته (GPa)
X70	۶۴۰	۷۴۰	٪۱۸	۲۲۵

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.7.0]

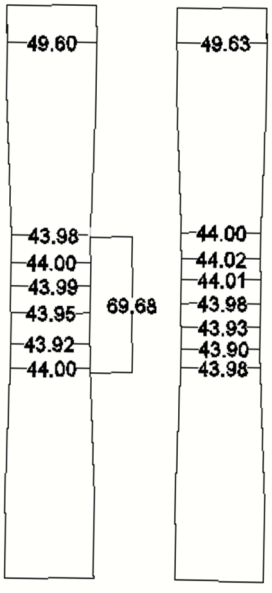


شکل ۱- مشخصات هندسی نمونه‌های استوانه‌ای (واحد mm)



شکل ۲- نمایی کلی از آزمایش یک سویه فشاری

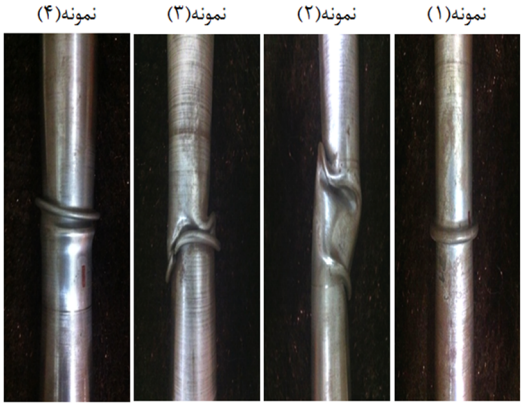
به منظور بررسی تاثیر ناراستی بر مودهای خرابی، چهار نمونه استوانه‌ای مطابق با هندسه ارائه شده در شکل ۱ ساخته شده و تحت بارگذاری یک‌سویه فشاری قرار گرفته است. به طور قطع نمونه‌های آزمایشگاهی در اثر فرآیند ساخت در کارخانه و یا عملیات تراشکاری دارای ناراستی‌های هندسی می‌باشند. به منظور اندازه‌گیری دقیق نمونه‌های آزمایشگاهی در این پژوهش از اسکنر اپتیکی ATOS بهره‌برداری شده است. این اسکنر نوری با تاباندن پترن نوری توسط پروژکتور به سطح و تصویربرداری از آن امکان برداشت مختصات نقاط به صورت سه بعدی با دقت اندازه‌گیری ۳۰ میکرون را فراهم نموده است. البته شایان ذکر است که با توجه به هزینه بالای انجام اسکن سه‌بعدی و محدودیت‌های موجود در دسترسی به تجهیزات مورد نظر فقط یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی مورد اسکن سه بعدی قرار گرفته است. شکل ۳ دو مقطع طولی مربوط به یک نمونه استوانه‌ای، حاصل از عکس‌برداری سه‌بعدی انجام شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود نمونه آزمایشگاهی در قسمت میانی درای ناراستی‌های هندسی می‌باشد. شکل ۴ مود خرابی هر یک از نمونه‌ها را پس از انجام آزمایش نشان می‌دهد. با توجه به مودهای خرابی متفاوت نشان داده شده در شکل ۴ و عدم خروج از مرکزیت نیروی فشاری اعمال شده به نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که هندسه ناراستی به طور چشمگیری بر مود خرابی اعضای استوانه‌ای تاثیر گذار است. مود خرابی نمونه(۱) نشان داده شده درشکل ۴ متناظر با مقاطع طولی ارائه شده در شکل ۳ می‌باشد.



شکل ۳- مقاطع طولی حاصل از عکس برداری سه بعدی نمونه(۱) واحد(mm)

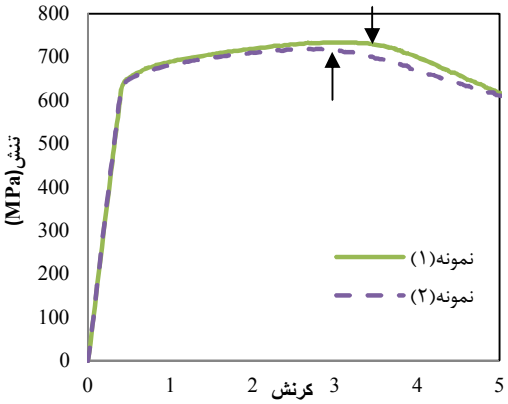
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.7.0]

همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه یاد شده چین خوردگی به صورت موضعی از ضعیف ترین محل نمونه رخ داده و با توجه به تقارن موجود در ناراستی هندسی، چین خوردگی نیز به شکل متقارن رشد کرده است. در واقع این نمونه بدلیل حضور ناراستی دچار کمانش محلی شده است. اما رشد و گسترش چین خوردگی در دیگر مودهای خرابی به دلیل عدم تقارن ناراستی هندسی موجود در آن‌ها، به شکل نامتقارن رشد کرده‌اند.



شکل ٤- مودهای خرابی نمونه‌های آزمایشگاهی

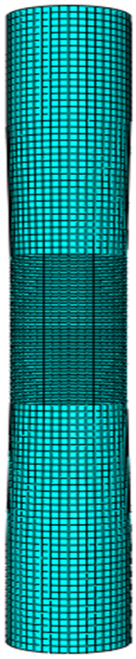
نتایج نشان دادند که هندسه ناراستی بر مسیر منحنی تنش-کرنش نیز تاثیر گذار است. منحنی تنش-کرنش نمونه‌های (۱) و (۲) در شکل ۵ ارائه شده است. شکل ۵ نشان می‌دهد که تغییر هندسه ناراستی در نمونه‌ها، تنش حداکثر و کرنش معادل آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد.



شکل ۵- منحنی تنش-کرنش نمونه (۱) و (۲)

۳- مدل‌سازی عددی

با استفاده از مدل ساخته شده در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS آزمایش‌های انجام شده مدل‌سازی شده‌اند. مدل مورد نظر با استفاده از المان پوسته‌ای S4R ساخته شده است. مدل شبکه‌بندی شده در شکل ۶ نمایش داده شده است. شبکه‌بندی ناحیه میانی با توجه به بروز چین خوردگی‌ها و کمانش موضعی در این محل از اهمیت بالایی برخوردار است. بر اساس یک مطالعه پارامتریک، اندازه المان در جهت طولی، در قسمت میانی لوله ۰/۰۱ طول لوله در نظر گرفته شد تا ضمن ارضای شرایط همگرایی مسئله، دقت کافی نیز در حل مسئله اعمال شود. اندازه مشابهی برای بعد المان در راستای محیطی لوله لحاظ گردید. شبکه المان درشت‌تری برای سایر نواحی در طول لوله در نظر گرفته شد.

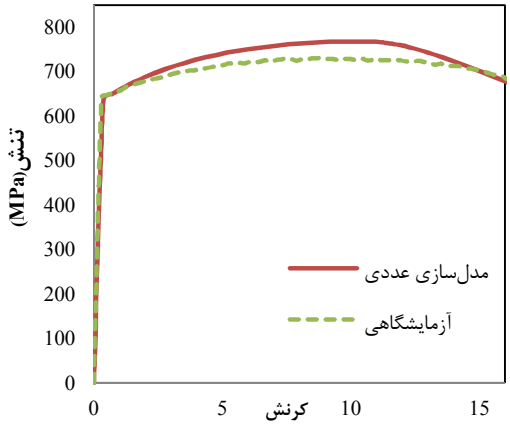


شکل ٦- نحوه مش‌بندی نمونه مدل‌سازی شده

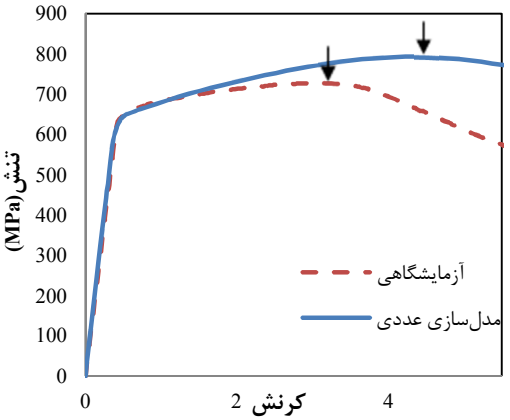
خواص غیرخطی فولاد، به همراه رفتار سخت شوندگی و نرم شوندگی غیرخطی سینماتیک/ ایزوتروپیک برای مدل‌سازی دقیق نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. قوانین مربوط به تغییر شکل در این مدل‌ها شامل یک جزء سخت‌شدگی سینماتیک است که جابه‌جایی سطح

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.7.0]

گسیختگی در فضای تنش را بیان می‌کند. در این مدل نسبت C/γ نشان دهنده حداکثر جابه‌جایی سطح گسیختگی و پارامتر γ سرعت جابه‌جایی سطح گسیختگی را نشان می‌دهد. جزء سخت‌شدگی ایزوتروپیک نیز تغییرات اندازه سطح تسلیم در فضای تنش را بیان می‌کند. پارامتر Q حداکثر تغییر اندازه سطح تسلیم و پارامتر b سرعت این تغییر را نشان می‌دهد. درستی داده‌های مربوط به پارامترهای سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی در مدل‌سازی از اهمیت بالایی برخوردار است. پارامترهای سخت‌شوندگی با استفاده از روش تناوب‌های متعدد پایدار شده بر روی نمونه‌های کوچک استخوانی به‌دست آمده و با نتایج آزمایشگاهی تصحیح شده‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده، ترکیبی از سخت شوندگی سینماتیک و نرم شوندگی ایزوتروپیک به منظور تعریف خواص غیر خطی فولاد در نظر گرفته شده است. جدول ۲ پارامترهای سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی سینماتیک/ ایزوتروپیک را نشان می‌دهند. صحت سنجی مدل اجزای محدود با استفاده از نتایج آزمایش کشش نمونه استاندارد کوپن و آزمایش یک سویه فشاری نمونه استوانه‌ای (۱) انجام شده است. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب مدل‌سازی آزمایش کشش استاندارد کوپن و آزمایش یک سویه فشاری را نشان می‌دهند. در ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای به صورت کامل و بدون حضور ناراستی مدل‌سازی شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است نتایج حاصل از مدل‌سازی و آزمایش کمی با یکدیگر اختلاف دارند که دلیل اصلی آن وجود ناراستی در نمونه آزمایشگاهی است. ناراستی‌های موجود در نمونه‌های آزمایشگاهی ناشی از عوامل ساخت لوله و عملیات تراشکاری بر روی آن است.



شکل ۷- مقایسه آزمایش کشش استاندارد با نتایج عددی



شکل ۸- مقایسه آزمایش یک سویه فشاری با مدل‌سازی عددی

جدول ۲- پارامترهای سخت شوندگی سینماتیک/ ایزوتروپیک

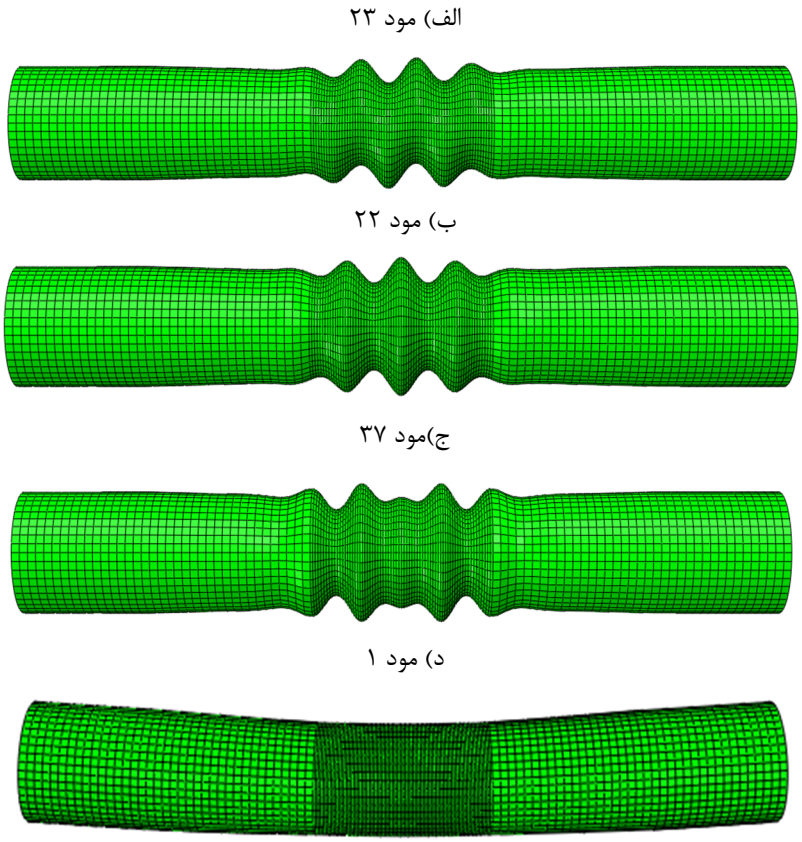
پارامترهای سخت شوندگی سینماتیک				پارامترهای نرم شوندگی ایزوتروپیک
درجه لوله	C (MPa)	γ	Q (MPa)	b
X70	۷۱۰۰	۳۱	۱۵۵	۰/۶

۴- تاثیر ناراستی

هندسه عضو استوانه‌ای در مدل‌سازی بخش قبل به صورت کامل و بدون حضور ناراستی در نظر گرفته شده است. در این بخش تاثیر ناراستی بر رفتار عضو استوانه‌ای تحت بارگذاری یک سویه فشاری بررسی می‌شود. هندسه ناراستی با توجه به مودهای مختلف کمانش که عضو تحت نیروی فشاری، از خود نشان می‌دهد در نظر گرفته شده است. در ابتدا با استفاده از نرم افزار ABAQUS تحلیل کمانش عضو استوانه‌ای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.7.0]

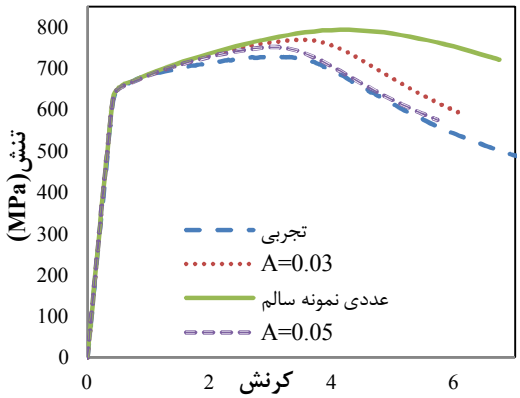
انجام شده و مودهای مختلف کمانش به‌دست آمده است. شکل ۹ چهار نمونه از مودهای کمانش که در ادامه به عنوان ناراستی اولیه در لوله در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد. شکل ۹-الف نمونه‌ای از ناراستی نامتقارن و شکل ۹-ب نمونه‌ای از ناراستی متقارن را نشان می‌دهد.



شکل ۹- نمونه‌ای از مودهای کمانش

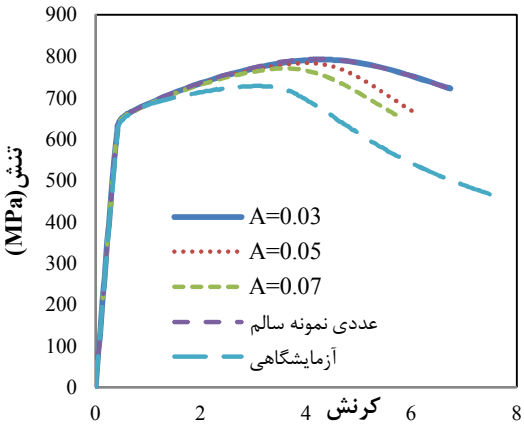
۴-۱- تاثیر دامنه و هندسه ناراستی

در این بخش تاثیر دامنه و هندسه ناراستی بر رفتار عضو، تحت بارگذاری یک سویه بررسی می‌گردد. شکل‌های ۱۰، ۱۱ نمونه‌ای از تاثیر ناراستی بر رفتار لوله تحت بارگذاری یک سویه فشاری را نشان می‌دهد. در این شکل‌های به ترتیب مودهای ۲۲ و ۲۳ کمانش به عنوان ناراستی اولیه در عضو در نظر گرفته شده است. دامنه ناراستی(A) برابر با مقادیر ۰/۰۳، ۰/۰۵ و ۰/۰۷ میلیمتر در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن ناراستی در عضو، نتایج عددی به آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌شوند که این موضوع بیانگر وجود ناراستی در نمونه آزمایشگاهی است.



شکل ۱۰- تاثیر مود ۲۲ بر پاسخ لوله تحت بارگذاری یک سویه (واحد mm)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.7.0]



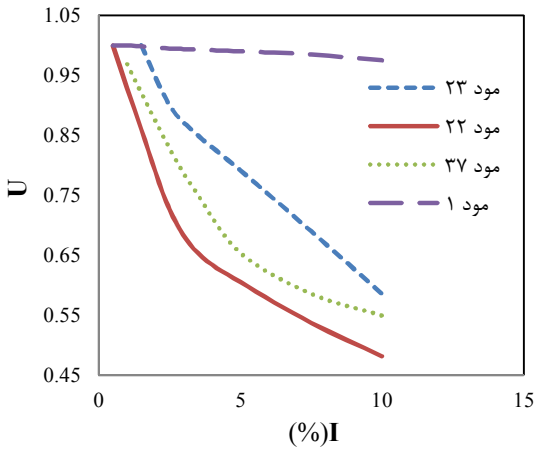
شکل ۱۱- تاثیر مود ۲۳ بر پاسخ لوله تحت بارگذاری یک سویه (واحد mm)

در شکل ۱۱ توجه شود که ناراستی با دامنه ۰/۰۳ میلیمتر تاثیری بر رفتار لوله نداشته است. در واقع مود ۲۳ که دارای هندسه‌ای نامتقارن است نسبت به مود ۲۲ که دارای هندسه متقارنی است تاثیر کمتری داشته است که این موضوع بیانگر تاثیر هندسه ناراستی بر رفتار عضو است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهند که حضور ناراستی اولیه در لوله بر دو عامل تاثیرگذار است:

۱-تنش حداکثر قابل تحمل توسط عضو(σ_L)

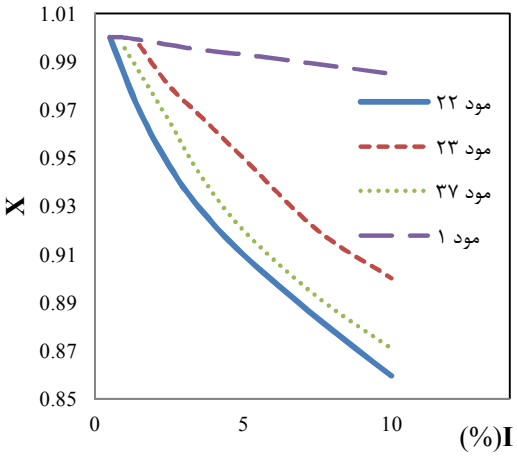
۲-کرنش معادل تنش حداکثر قابل تحمل توسط عضو (ε_L)

حضور ناراستی در اعضای لوله‌ای منجر به بروز کمانش محلی می‌شود که این موضوع باعث کاهش هر دو عامل مذکور می‌شود. البته باید توجه داشت که مرتبه کاهش هر دو عامل، متاثر از هندسه ناراستی است. به منظور ارزیابی بهتر تاثیر ناراستی از دو نسبت بی بعد X و U که به ترتیب برابر با تنش حداکثر قابل تحمل توسط عضو همراه با ناراستی به تنش حداکثر قابل تحمل توسط عضو سالم و کرنش معادل تنش حداکثر قابل تحمل توسط عضو همراه با ناراستی به کرنش معادل تنش حداکثر قابل تحمل توسط عضو سالم استفاده شده است. در واقع U و X ضرایب کاهش کرنش و تنش حداکثر در اثر حضور ناراستی هستند. در این بخش دامنه ناراستی(A) به نسبت ضخامت لوله(t) بی بعد شده است و نسبت مذکور با پارامتر I نشان داده شده است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ کاهش ضرایب X و U را نسبت به پارامتر بی بعد I به ازای مودهای مختلف کمانش نشان می‌دهند. نتایج نشان دادند که مود ۲۲ که هندسه‌ای متقارن دارد بیشترین تاثیر و مود ۱ کمترین تاثیر را بر رفتار یک سویه اعضای استوانه‌ای دارند. مشاهده می‌شود که پارامتر U کاهش بیشتری نسبت به پارامتر X داشته است. با در نظر گرفتن مود ۲۲ به عنوان هندسه ناراستی و نسبت I برابر ۵ درصد، کرنش حداکثر ۴۰ درصد کاهش می‌یابد ولی تنش حداکثر تنها ۵ درصد کاهش می‌یابد که این موضوع حاکی از تاثیر بیشتر ناراستی بر کرنش حداکثر دارد. با توجه به شباهت میان هندسه ظاهری مودهای ۲۲ و ۲۳ در شکل ۹ ملاحظه می‌شود که مود ۲۲ تاثیر بیشتری نسبت به مود ۲۳ دارد. به عنوان نمونه با در نظر گرفتن نسبت I برابر ۵ درصد، در مود ۲۲ ضریب U برابر ۰/۶ ولی در مود ۲۳ برابر با ۰/۸ است. ضریب X نیز از این شرایط پیروی می‌کند. توجه شود که اختلاف اندک میان مودهای ۲۲ و ۲۳ تاثیر نسبتاً زیادی بر رفتار یک سویه لوله دارد.



شکل ۱۲- تاثیر ناراستی بر کاهش کرنش حداکثر

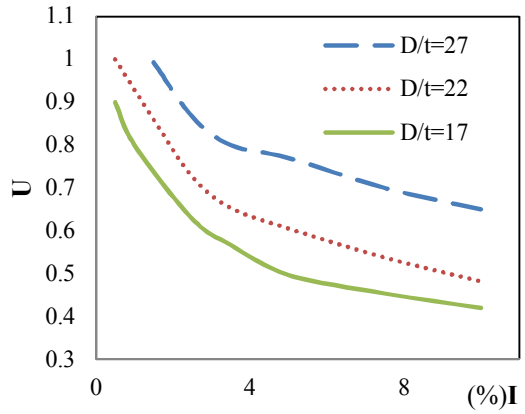
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.7.0]



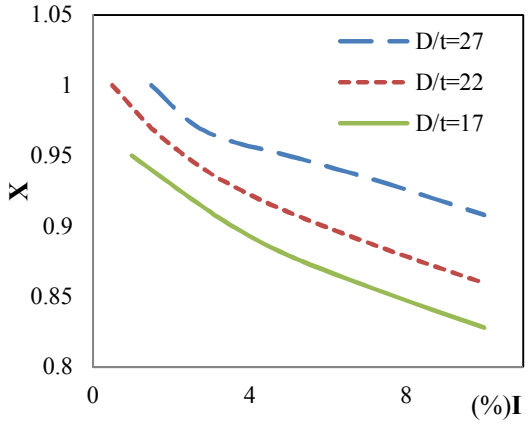
شکل ۱۳- تاثیر ناراستی بر کاهش تنش حداکثر

۴-۲- تاثیر نسبت D/t

در این بخش تاثیر نسبت قطر لوله به ضخامت لوله بر رفتار اعضای لوله‌ای همراه با ناراستی‌های هندسی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به بروز چروکیدگی‌ها و رشد آن‌ها و از طرفی تاثیر زیاد مود ۲۲ نسبت به دیگر مودهای کمانشی بر رفتار اعضای لوله‌ای که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفته است، هندسه ناراستی معرفی شده در مدل عددی در تمامی آزمایشات این بخش مطابق با مود ۲۲ کمانش در نظر گرفته شده است. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ تاثیر نسبت D/t به ازای مقادیر ۱۷، ۲۲ و ۲۷ بر دو پارامتر X و U را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نسبت D/t حساسیت اعضای استوانه‌ای به ناراستی‌های هندسی کاهش می‌یابد و هر دو پارامتر X و U کاهش می‌یابند. البته شایان ذکر است که در این آزمایش‌ها ضخامت لوله یکسان در نظر گرفته شده و با تغییر قطر لوله نسبت D/t در حال تغییر است. در واقع می‌توان اظهار داشت که با کاهش نسبت D/t نسبت دامنه ناراستی به قطر لوله در حال افزایش است و در شکل‌ها نشان داده شده دامنه ناراستی به نسبت ضخامت لوله بی‌بعد شده است. با توجه به این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که تاثیر نسبت D/t بر پارامتر U بیشتر از پارامتر X است، به طوری که با افزایش نسبت D/t از مقدار ۱۷ به ۲۷ پارامتر U به میزان ۵۷ درصد افزایش می‌یابد در حالی که پارامتر X تنها به میزان ۱۰ درصد رشد می‌کند.



شکل ۱۴- تاثیر نسبت D/t بر کرنش حداکثر



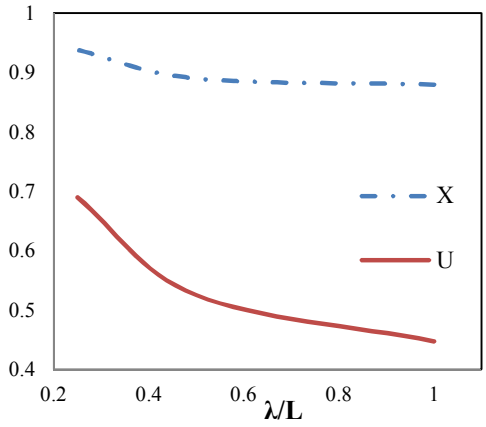
شکل ۱۵- تاثیر نسبت D/t بر تنش حداکثر

۴-۳- تاثیر نسبت λ/L

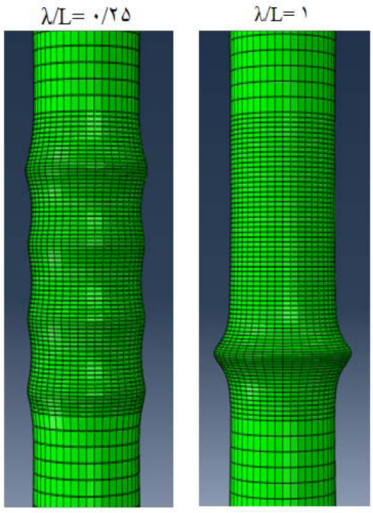
در این بخش تاثیر نسبت طول موج ناراستی(λ) به طول لوله(L) بر رفتار اعضای لوله‌ای همراه با ناراستی‌های هندسی مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش هندسه ناراستی به شکل سینوسی در نظر گرفته شده است. تمامی آزمایشات انجام شده در این بخش به ازای نسبت D/t برابر با ۲۲ و دامنه ناراستی برابر با ۰/۲ میلیمتر انجام شده است. شکل ۱۶ تاثیر نسبت λ/L به ازای مقادیر مختلف بر دو پارامتر X و U را نشان می‌دهند. در این شکل ملاحظه می‌شود که با کاهش نسبت λ/L پارامتر U افزایش یافته ولی پارامتر X تغییر چندانی نکرده است. با کاهش یافتن نسبت λ/L ناراستی در طول لوله به دفعات تکرار می‌شود که این موضوع منجر به کمانش پلاستیک در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.7.0]

لوله می‌شود. به عنوان نمونه شکل ۱۷ مودهای خرابی به ازای نسبت λ/L برابر با مقادیر ۱ و ۰/۲۵ را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت λ/L تعداد چین خوردگی در طول لوله افزایش یافته و این امر با وارد کردن تمامی طول لوله به حالت پلاستیک و دور شدن از کمانش محلی، منجر به افزایش کرنش حداکثر قابل تحمل در عضو می‌شود.



شکل ۱۶- تاثیر نسبت λ/L بر دو پارامتر X و U



شکل ۱۷- شکل خرابی به ازای نسبت λ/L برابر با ۱ و ۰/۲۵

۵- نتیجه‌گیری

اعضای لوله‌ای پس از ساخت دارای ناراستی‌های هندسی در مقطع و طول خود هستند که این موضوع می‌تواند در حین نصب عضو در محل تشدید شود. در این پژوهش حساسیت اعضای لوله‌ای به ناراستی‌های هندسی مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده شد با افزایش دامنه ناراستی، به ترتیب اولویت، کرنش حداکثر قابل تحمل عضو و سپس بر تنش حداکثر قابل تحمل توسط عضو تاثیر گذاشته و هر دو عامل را کاهش می‌دهد. روند کاهش تنش و کرنش حداکثر متاثر از هندسه ناراستی و نسبت D/t و λ/L است. ملاحظه شد که با وجود شباهت میان مودهای ۲۲ و ۲۳، هندسه مود ۲۲ تاثیر بیشتری نسبت به هندسه مود ۲۳ داشته است که این موضوع به دلیل وجود تقارن در مود ۲۲ است. نتایج نشان دادند که با افزایش نسبت D/t حساسیت اعضای لوله‌ای به حضور ناراستی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که با کاهش نسبت λ/L که منجر به تکرار ناراستی به دفعات زیادی در لوله می‌شود، اعضای لوله‌ای دچار کمانش پلاستیک می‌شوند و این موضوع منجر به افزایش تنش حداکثر و کرنش معادل آن می‌شود. با توجه به نتایج نشان داده شده، بازه‌ای از نسبت دامنه ناراستی به ضخامت لوله ($I = \frac{A}{t}$) که تاثیر چندانی بر رفتار اعضای لوله‌ای ندارد را می‌توان به ۲/۵٪ برای تنش حداکثر و ۱٪ برای کرنش معادل تنش حداکثر محدود کرد.

مراجع

[1] Gaylord, E.H., Gaylord, C.N., (1984), Design of Steel Bins for Storage of Bulk Solids.
[2] EN 1993-1-6. Eurocode 3, (2007), Design of steel structures, Part 1.6, General rules – Strength and stability of shell structures, CEN, Brussels.
[3] Arbocz, J., Babcock, C.D., (1969), The effect of general imperfections on the buckling of cylindrical shells, Journal of Applied Mechanics, Vol.36, p.28–38.
[4] Corona, E., Kyriakides, S., (2000), Asymmetric collapse modes of pipes under combined bending and external pressure, Journal of Engineering Mechanics, Vol.126, p.1232–9.
[5] Kim, S.E., Kim, C.S., (2002), Buckling strength of the cylindrical shell and tank subjected to axially compressive loads, Journal of Thin-Walled Structures, Vol.40, p.329–353.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.7.0]

[6] Bornscheuer, F.W., Haefner, L., (1983), The influence of an imperfect circumferential weld on the buckling strength of axially loaded circular cylindrical shells, 3rd International Colloquium on Stability of Metal Structures, Paris, p.407–414.
[7] Mathon, C., Limam, A., (2006), Experimental collapse of thin cylindrical shells submitted to internal pressure and pure bending, Journal of Thin-Walled Structures, Vol.44, p.39–50.
[8] Sliz, R., Chang, MY., (2011), Reliable and accurate prediction of the experimental buckling of thin-walled cylindrical shell under an axial load, Journal of Thin-Walled Structures, Vol.49, p.409-421.
[9] Dubourg, V., Bourinet, JM., Sudret, B., (2012), Reliability-based design optimization of imperfect shells using adaptive kriging meta-models, Journal of cornel university, Vol. 31, p.225-235.
[10] Bahaoui, J., Bakkali, L., Khamlichi, A., (2012), Buckling strength of axially compressed thin axisymmetric shells as affected by localized initial geometric imperfections, Journal of International review of applied sciences and engineering, Vol.3, p.1-14.
[11] Prabu, B., Raviprakash, AV., Rathinam, N., (2012), Numerical buckling analysis of thin cylindrical shells with combined distributed and local geometrical imperfections under uniform axial compression, Journal of Computer Aided Engineering and Technology, Vol.4, p.295-320.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.7.0]